

現成氷河の質量収支データに基づく涵養域比(AAR)法の検証

著者	青木 賢人
雑誌名	地理学評論
巻	72
号	11
ページ	763-772
発行年	1999-11-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/9661

現成氷河の質量収支データに基づく涵養域比 (AAR) 法の検証

青木賢人 (東京大学大学院生)

地形的雪線高度は古環境復元の重要な指標の一つである。涵養域比 (accumulation area ratio: AAR) 法は過去の氷河の地形的雪線高度の認定法として精度が高いと指摘されていたが、解析に用いる AAR 値は研究者によって大きく異なっている。そこで地形的雪線高度の復元に用いるための適切な AAR 値を求めるため、現成氷河の AAR 値と質量収支との関係を検討した。各氷河の質量収支と AAR 値は高い相関を示すことが知られており、世界各地の 32 氷河について質量収支の均衡を仮定した場合の AAR 値 (AAR_0 値) を平均すると $59.2 \pm 6.7\%$ となり、氷河のタイプによる差は認められなかった。明瞭なモレーンを含む氷河地形は、長期的に停滞していた氷河分布を示している。このような氷河では質量収支は均衡していたと考えられるので、上記の平均的な AAR_0 値を用いることで氷河地形形成時の地形的雪線高度を復元することができる。

キーワード：涵養域比 (AAR) 法、地形的雪線、平衡線高度、質量収支、氷河地形

I はじめに

氷河の古気候環境復元にはさまざまな指標が用いられているが、気候的雪線高度を用いた気温・降水量復元はその代表例の一つである (Ono 1984)。気候的雪線高度は広域的雪線とも呼ばれ、各氷河の各年における平衡線高度 (equilibrium line altitude: ELA) の長期的平均である地形的雪線高度を地域的に平均したものと定義される (小野 1981)。したがって、氷河地形から過去の氷河の ELA あるいは地形的雪線高度を認定することは、氷河地形を指標とした古環境復元のために重要である。

雪氷学的な意味での ELA は各氷河における年々の質量収支が 0 となる点を連ねた線として定義される (野上・小野 1981)。現成の氷河では層位学的システムあるいは確定日付システムによる年間質量収支の面的な実測に基づいて ELA を認定している。一方、過去の氷河の質量収支を直接に算出できないため、当時形成された氷河地形などを用いて ELA あるいは地形的雪線を復元する必要がある。これまで氷河地形から地形的雪線を復元する方法として、median elevation of glacier 法 (MEG 法: Manly 1959; Meierding 1982), toe-to-headwall

altitude ratio 法 (THAR: Meierding 1982; Murray and Locke 1988), accumulation area ratio 法 (AAR 法: Meierding 1982; Hawkins 1985) などの多くの方法が考案されている。このうち MEG 法と THAR 法は氷河の上端から末端までの比高、すなわち一次元データを既存の地形図から計測し各氷河の地形的雪線を復元する手法である。また、AAR 法は氷河の高度別表面積、すなわち二次元データを活用する方法である。

劉・小野 (1997) はこうした既存の地形図判読に基づく方法では判読の誤差が大きく、地形的雪線の認定精度が悪くなることを指摘した。そして、三次元流体としての氷河の振る舞いを重視し、解析図化機で作成された高精度大縮尺地形図と詳細な現地調査により復元された氷河断面とを用いた地形的雪線の認定法を提案した。この方法により復元される地形的雪線の精度は高いと思われるが、解析図化機による作業と詳細な現地調査には多大な労力を要する。また、諸外国では図化に用いる垂直空中写真の入手や現地調査が困難な場合も多い。したがって、広域に分布する多くの氷河を一度に取り扱い地域的傾向を抽出するような場合には、既存の地形図を用いる簡便な方法も有効と思われる。

既存の地形図を用いた地形的雪線の復元手法の中で、質量収支の実測から求めた現成氷河の ELA と最も適合する手法は AAR 法とされている (Hawkins 1985). この方法では、氷河全面積に対する涵養域面積の比 (AAR) として一定の値 (本稿では AAR 値と表記する) を与え、この値を満たす高度を ELA とみなしている. しかし、同一氷河における長期間の質量収支実測によると AAR は年により大きく変動する (Kasser 1973). このため、氷河あるいは氷河地形の表面積に対してアプリアリに一定の AAR 値を与え、ELA もしくは地形的雪線を算出する方法は十分な賛同を得ていない.

また、これまでの研究で用いられた AAR 値も研究者により大きく異なっている (表 1). AAR 法では AAR 値の相違が地形的雪線高度の推定に強く影響する. とくに傾斜の大きな氷河や細長い氷舌を持つ谷氷河では、単位面積あたりの高度変化が大きいためわずかな AAR 値の差が地形的雪線高度の推定値を大きく変化させる. したがって、地形的雪線高度を精度よく推定するためには AAR 値として妥当な値を用いる必要がある.

一方、多くの現成氷河で質量収支の実測が継続的に行われ、各観測年の AAR 値も報告されている. これまでも現成氷河の質量収支の実測結果と AAR 値との関係を検討した研究が行われている (Porter 1975; Torsnes et al. 1993; Kulkarni 1992) が、これらの研究では特定地域における特定のタイ

プの氷河が主な研究対象となっている. そのため、異なる条件下の氷河に対して単一の AAR 値がどの程度適用可能かは検討されていない.

そこで本研究では、広域に分布するさまざまなタイプの現成氷河における質量収支の実測結果を用いて AAR と質量収支との関連を検討し、地形的雪線高度の推定に適切な AAR 値を求めることを目的とする.

II 氷河の年々の質量収支と AAR 値との関係

従来、AAR が 50% より小さいときには氷河全体が負の質量収支となるが 50~80% で定常状態となり、80% を越えると正の質量収支となると指摘されている (Meier and Post 1962; Hawkins 1985; Nesje 1992). この指摘の妥当性を確認するために、最初に全氷河の各年の質量収支と AAR 値との関係を検討した (図 1).

世界各地の現成氷河においてさまざまな団体が氷河変動の観測を行っている. 国際水文学会 (IAHS), 国連環境計画 (UNEP), 国連教育科学文化機関 (UNESCO) では、共同プロジェクトとしてこれらのデータを集約し、1960 年から 5 年ごとに *Fluctuations of glaciers* (以下 FG と記す) として公表している. 本研究では、このうち 1965 年以降の Vol. II (Kasser 1973), Vol. III (Muller 1977), Vol. IV (Haeberli 1985), Vol. V (IAHS/UNEP/UNESCO 1988), Vol. VI (IAHS/UNEP/UNES-

表 1 先行研究で用いられている涵養域比
Table 1 AARs used in previous studies

AAR (%)	References
75.0*	Charlesworth, 1957 (various regions)
66.7*	Ito, 1982 (Japan); Yanagimachi, 1983 (Japan)
65.0	Meierding, 1982 (Colorado); Yanagimachi, 1987 (Japan)
60.0*	Callender, 1950 (Norway); Ono, 1984 (Japan)
58.0	Meier and Post, 1962 (Cascades)
50.0*	Nogami, 1970 (Andes)
44.0	Kulkarni, 1992 (Indian Himalayas)

*Originally accumulation area/ablation area ratio

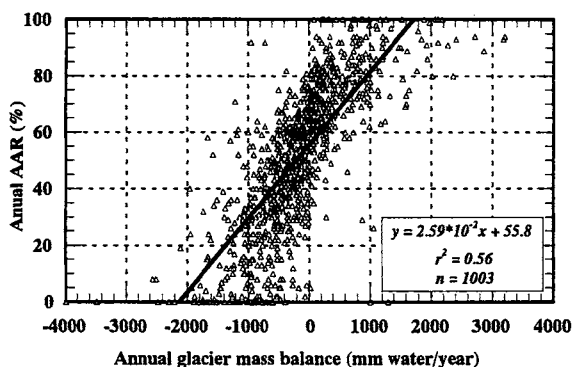


図1 各氷河で観測された各年の質量収支と AAR 値の関係

Fig. 1 Relationship between annual AARs and annual mass balances for modern glaciers

CO 1993) に掲載されているデータから、①単年の質量収支、②収支算出期間、③AAR（もしくは氷河面積、涵養域面積、消耗域面積の中から二つ）、④氷河のタイプ（3-digit code）、の 4 データがすべて揃っている 15 カ国 135 氷河を抽出した。観測期間は最長 32 年、最短 1 年である。このうち、浮遊分離型氷河（8 氷河）は消耗の様式が通常の氷河と大きく異なり、涵養域と消耗域の面積バランスが成り立たないため AAR 法による ELA の算出には不適當である。そこで、残りの 127 氷河を解析対象とした。

従来の指摘の通り、AAR 値は特定の値に収斂せず 0～100% まで大きなバラツキを示した。しかし、AAR 値と質量収支の間には正の相関 ($r^2=0.56$) が存在し、偏回帰係数の t 検定によって 0.1% レベルで有意と確認された。このことから、各年の AAR 値が特定の値に収斂していないのは年々の質量収支のバラツキが主な原因と判断される。一方、一次回帰式の y 切片、すなわち質量収支均衡時の AAR 値は 55.8% となり、従来報告されている値 ($60 \pm 5\%$: Porter 1975; Torsnes et al. 1993) の範囲内となった。しかし、回帰式の相関もさほど高くないことと、 $\pm 17.4\%$ と大きな標準偏差が伴う

ことを考えると、この 55.8% を質量収支均衡時の一般的な AAR 値とみなすことはできない。

III 質量収支均衡の仮定と収支均衡時の AAR 値

質量収支均衡時の AAR 値についてより詳しく検討するために、各氷河別に各年の質量収支と AAR との関係を一次回帰し、質量収支が 0 となる時の AAR (y 切片) を検討した。なお、一部の氷河では AAR=100% または AAR=0% の年が観測されている。この場合、同じ AAR が 100% もしくは 0% で一定であっても質量収支の値は年によって変動する。すなわち、AAR の極値である 100% と 0% の場合には AAR と質量収支の間に相関が存在しない。そこで解析の際には AAR=100% と AAR=0% の年のデータをすべて除外した。

図 2 に代表的な氷河に関する回帰結果を示した。この方法により算出された y 切片、すなわち質量収支が 0 となる時の AAR は *Glacier mass balance bulletin* (以下 MBB と記す) (Haeberli and Herren 1991; Haeberli et al. 1994, 1996, 1999) に $[AAR_0]$ として報告されている値である。MBB では観測年数が 6 年間以上の氷河について AAR_0 値の算出を行っている。MBB は II での解析に用いた FG の年報に当たる同格の出版物であり、個々の氷河の詳細な記載がなされている。MBB は編集を行っている World Glacier Monitoring Service (WGMS) の Web ページ (<http://www.geo.unizh.ch/wgms/>) で公開されている。最新の MBB No. 5 (Haeberli et al. 1999) には、49 氷河について各氷河の観測開始から 1997 年までの観測結果を用いて算出した AAR_0 値が掲載されている。これは FG に掲載されているデータよりも長い観測期間であり、多数のデータが用いられているため、算出された AAR_0 は統計的信頼性が高い。そこで、本研究でも以降の解析に MBB No.5 に掲載されている AAR_0 値を主として用い、MBB No.5 には記

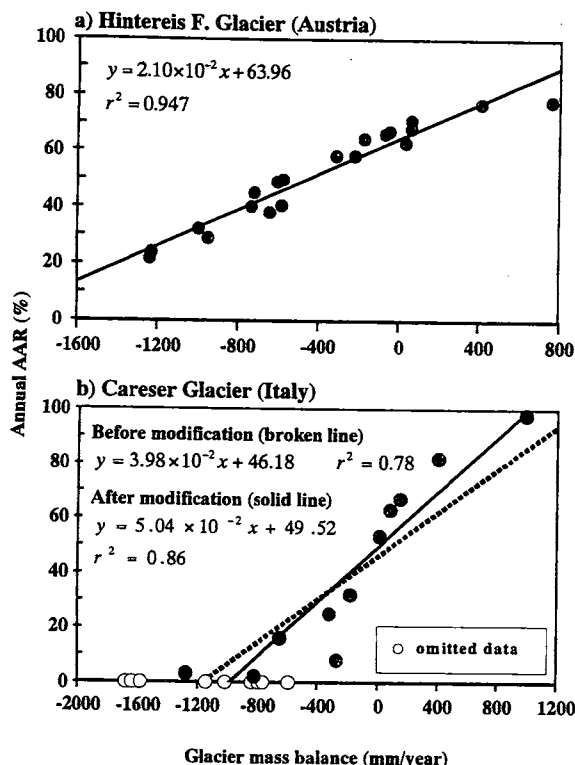


図2 代表的な氷河における各年の質量収支と AAR 値との関連

直線の y 切片が AAR₀ 値を示す。

Fig. 2 Relationships between annual AARs and annual mass balances for selected glaciers

The intercept with the ordinate gives the AAR₀ value.

載されていないものの長期間の観測データ（6 年間以上）がある氷河については、MBB No.1 (Haeberli and Herren 1991) および FG からのデータを用いて補足することとした。解析に用いた 67 氷河については属性データとあわせ表 2 に示した。

解析対象とした 67 氷河における AAR₀ 値の平均は $57.1 \pm 9.1\%$ （誤差は標準偏差 1 σ ）となり、大半の氷河（49 個, 73.1%）が誤差範囲内に該当した。また平均値は $60 \pm 5\%$ (Porter 1975; Torsnes et al. 1993) の範囲内となった。

この値は、全氷河のデータを一括して回帰した場合の推定値 ($55.8 \pm 17.4\%$, 図 1 参照) ともおおむね

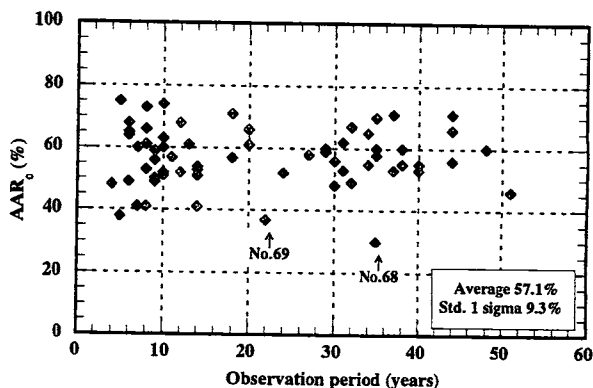


図3 各氷河の AAR₀ 値と観測年数との関係
Fig. 3 Relationships between AAR₀ value and the observation period

一致する。しかし 10% 近い大きな誤差を伴うため、劉・小野 (1997) が指摘するように過去の地形的雪線高度を復元するためには十分な値とはいえない。また、AAR₀ 値のパラツキは質量収支の観測期間が短いほど大きくなる (図 3)。とくに観測期間が 15 年以下の氷河ではパラツキが大きく ($\pm 9.8\%$)、これらのデータによって全体の誤差が大きくなっている。そこで、観測期間が 15 年を越える氷河 (35 氷河) を抽出して AAR₀ 値の平均値を求めると $57.7 \pm 9.0\%$ となり、やや誤差も小さくなった。

さらに、観測期間が 15 年を越える氷河について個々の氷河のデータを検証すると、全体の傾向から著しく (2 σ 以上) はずれた値を示し、誤差を大きくしている氷河が二つある (図 3: No. 68, Gråsubreen; No. 69, Helm)。これらの氷河の詳細な情報については MBB に掲載されていないため、FG および MBB に掲載されている両氷河の質量収支データを検証した。両氷河とも回帰に用いたデータに正負の収支年が含まれ、回帰の決定係数も高い (Gråsubreen, $r^2=0.85$; Helm, $r^2=0.76$) ことが確認された。これは AAR₀ の算出が問題なく行われたことを示し、きわめて低い AAR₀ 値を持つ氷河の一群が実際に存在していることを示している。

表2 解析に用いた氷河一覧
Table 2 A list of glaciers analyzed

No Glacier	Country	Obs. periods Begin (yrs)	AAR ₀	Code ¹⁾ a b c	Area (km ²)	Note ²⁾	No Glacier	Country	Obs. periods Begin (yrs)	AAR ₀	Code ¹⁾ a b c	Area (km ²)	Note ²⁾
1 Storglaciären	Sweden	1946	51	46 5 2 8	59.16		36 Plattalva	Switzerland	1975	14	53 6 5 6	0.85	MBB1, *1
2 Storbreen	Norway	1949	48	60 5 2 6	5.26		37 Filleck Kees	Austria	1963	13	61 7 7 0	0.15	FG, *1
3 South Cascade	U.S.A.	1953	44	56 5 3 8	2.61		38 Rabots glaciär	Sweden	1985	12	52 5 2 8	3.82	*1
4 Hintereisferner	Austria	1953	44	66 5 1 8	9.01		39 Baby	Canada	1959	12	68 6 5 0	0.63	FG, *1
5 Kesselwandferner	Austria	1953	44	71 6 3 8	4.35		40 Riukojietna	Sweden	1986	11	57 3 0 3	4.60	*1
6 Kara-Batkak	Kirghiztan	1957	40	55 5 3 6	4.56		41 Garabashi	Russia	1987	10	60 0 0 8	4.47	*1
7 Ts. Tuyuksuyskiy	Kazakhstan	1957	40	53 5 3 6	3.05		42 Kongsvegen	Norway	1987	10	52 ND ND ND	ND	*1
8 Sonnblickkees	Austria	1959	38	60 6 0 6	1.75		43 Okstindbreem	Norway	1987	10	63 ND ND ND	ND	*1
9 Urumqihe S. No. 1	China	1959	38	55 6 2 2	1.90		44 Golubin	U.S.S.R.	1980	10	74 5 3 8	6.21	FG, *1
10 White	Canada	1960	37	71 5 1 5	38.55		45 Zavisha	Canada	1975	10	51 6 3 6	6.50	FG, *1
11 Silvretta	Switzerland	1960	37	53 6 2 6	3.18		46 Hofsjökull North	Iceland	1988	9	49 3 0 3	90.60	*1
12 Hellstugubreen	Norway	1962	35	58 5 1 8	3.19		47 Andrei	Canada	1977	9	59 4 2 8	92.22	FG, *1
13 Nigardsbreen	Norway	1962	35	60 4 3 8	47.80		48 Shaune Garang	India	1981	9	56 5 2 7	4.94	FG, *1
14 Maliy Aktru	Russia	1962	35	70 5 3 6	3.17		49 Blue	U.S.A.	1974	9	50 5 2 8	4.29	FG, *1
15 Hardangerjøkulen	Norway	1963	34	65 6 7 6	17.18		50 Jamtalfener	Austria	1989	8	73 5 2 6	3.85	*1
16 Älfotbreen	Norway	1963	34	55 4 3 6	4.80		51 Langfjordjøkulen	Norway	1989	8	66 4 3 8	4.80	*1
17 Place	Canada	1965	32	49 5 3 8	3.82		52 Hofsjökull Southwest	Iceland	1989	8	41 ND ND ND	ND	*1
18 Vernagtferner	Austria	1965	32	67 6 2 6	9.36		53 Hofsjökull East	Iceland	1989	8	53 ND ND ND	ND	*1
19 Peyto	Canada	1966	31	53 5 2 8	13.26		54 Alexander	Canada	1978	8	61 5 3 8	5.81	FG, *1
20 Gulkana	U.S.A.	1966	31	62 5 2 9	19.30		55 Yuri	Canada	1977	8	53 6 3 8	3.58	FG, *1
21 Wolverine	U.S.A.	1966	31	62 5 3 8	17.46		56 Måraglaciären	Sweden	1990	7	41 ND ND ND	ND	*1
22 Caresèr	Italy	1967	30	48 6 3 8	4.76		57 Hoegtuvbreen	Norway	1970	7	60 5 2 8	2.59	FG, *1
23 Austre Brøggerbreen	Norway	1967	30	56 5 2 9	6.10		58 Ochsentalferner	Austria	1991	6	64 5 3 8	2.56	*1
24 Midtre Lovénbreen	Norway	1968	29	60 5 2 9	4.80		59 Changmekhangpu	India	1980	6	49 5 3 0	4.50	FG, *1
25 Djankuat	Russia	1968	29	60 5 2 8	3.13		60 Bench	Canada	1980	6	65 6 3 8	10.48	FG, *1
26 Abramov	Kirghiztan	1968	29	59 5 2 8	26.06		61 Tiedemann	Canada	1980	6	68 5 2 9	62.69	FG, *1
27 Engabreen	Norway	1970	27	58 4 3 8	38.02		62 Maladeta	Spain	1992	5	38 6 4 8	7.50	*1
28 Kozelskiy	Russia	1973	24	52 5 3 9	1.78		63 Zongo	Bolivia	1992	5	75 ND ND ND	2.10	*1
29 No. 125	Russia	1977	20	66 3 0 3	0.93		64 Praviy Aktru	Russia	1985	4	48 5 3 6	2.55	MBB1, *1
30 Levij Aktru	Russia	1977	20	61 5 3 6	6.24		65 Vodopadnyy	Russia	ND	ND	64 ND ND ND	ND	MBB1, *1
31 Lewis	Kenya	1979	18	57 5 3 8	0.26		66 Gries	Switzerland	1962	35	59 5 3 4	6.29	*2
32 Devon Ice Cap	Canada	1960	18	71 3 0 3	1695.10	FG	67 Austdalsbreen	Norway	1988	9	62 4 2 4	11.95	*2
33 Wurtenkees	Austria	1983	14	41 6 2 8	2.03	*1	68 Gråsubreen	Norway	1962	35	30 4 3 8	9.55	*3
34 Sentinel	Canada	1970	14	54 5 3 0	1.81	FG, *1	69 Helm	Canada	1975	22	37 6 2 6	2.72	*3
35 Limmem	Switzerland	1975	14	51 6 2 7	2.52	MBB1, *1							

1) 3-digit code for classification of glaciers (UNESCO/IAHS, 1970)

a: Primary classification (0: Miscellaneous 1: Continental ice sheet 2: Ice field 3: Ice cap 4: Outlet glacier 5: Valley glacier 6: Mountain glacier 7: Glacieret 8: Ice shelf)

b: Form (0: Miscellaneous 1: Compound basins 2: Compound basin 3: Simple basin 4: Cirque 5: Niche 6: Crater 7: Ice apron 8: Groupe)

c: Frontal characteristics (0: Miscellaneous 1: Piedmont 2: Expanded foot 3: Lobed 4: Calving 5: Coalescing 6: Irregular clean ice 7: Irregular debris covered 8: Single clean ice 9: Single debris covered)

2) *1: Less than 15 years *2: Calving glacier *3: Omitted data in Fig.4 FG: Data from *Fluctuations of glaciers* MBB1: Data from *Glacier mass balance bulletin No.1*
ND: No data.

(after Haeberli et al., 1999 with some revision)

現段階ではこれらの氷河周辺の地形条件などに関する情報が得られないためこれ以上の検討はできないが、涵養域の周囲を急峻な岩壁に囲まれたヒマラヤ山脈の雪崩涵養型氷河では $AAR_0=0.4$ を下回る値¹⁾も報告されている (Fujii and Higuchi 1977) ことから、当該の2氷河の涵養環境も同様であると予想される。そこで、以下の解析は涵養条件が異なると予想される2氷河を除く32氷河のデータを用いて行った。その結果 AAR_0 値の平均値は $59.2 \pm 6.7\%$ ²⁾ となり、誤差範囲はさらに小さくなった (図4)。

この AAR_0 値の平均値算出に用いた観測期間の長い氷河には、氷河面積 $1,700 \text{ km}^2$ の氷帽氷河か

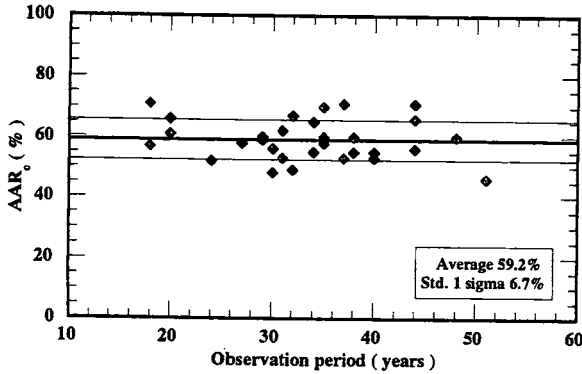


図4 観測年数が15年を越える氷河の AAR_0 値
No. 68 および No. 69 のデータを除外した。

Fig. 4 Variation of AAR_0 value for glaciers
observed over 15 years
Data for two glaciers (68 and 69) were omitted.

ら 0.3 km^2 の比較的小規模な氷河まで含まれ、末端形状にもさまざまなタイプが見られる。そこで各氷河の AAR_0 値と表2に示した面積およびタイプとの関係を検討した (図5, 表3)。面積との関係では $10^0 \sim 10^4 \text{ km}^2$ オーダーの氷河の数が多く、大氷河、小氷河の数は少なくなっているが、各氷河の面積と AAR_0 値の間に有意な相関は認められない (図5)。また、氷河のタイプとの相関に関しては、サンプル数が少ないためノンパラメトリック法の一つである Kruskal-Wallis 検定を適用した (表3)。その結果、各氷河の基本的分類 primary classification, 涵養域の形態による分類 form, 末端部の形状による分類 frontal characteristics それぞれと AAR_0 値の間には、有意水準10%でも帰無仮説

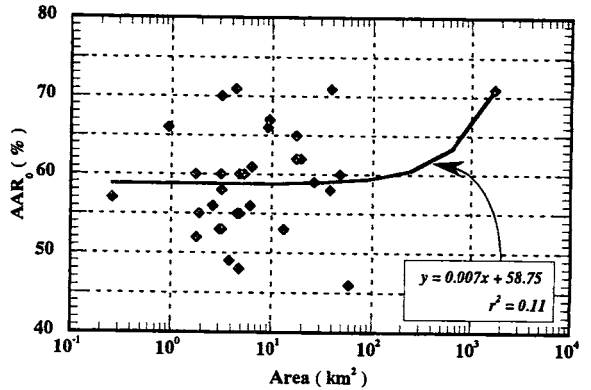


図5 AAR_0 値と氷河面積の関係

Fig. 5 Relationship between AAR_0 value and
glacier area

表3 氷河のタイプ別の AAR_0 に関する Kruskal-Wallis 検定の結果

Table 3 Results of the Kruskal-Wallis test

Classification of glaciers	h	H -value
a: Primary classification	4	3.904
b: Form	5	7.037
c: Frontal characteristics	6	7.431

The H -value is a statistic of the Kruskal-Wallis test such that

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^h \frac{R_j^2}{n_j} - 3(N+1)$$

$$R_j = \sum_{i=1}^{n_j} r_{ij} \quad N = \sum_{j=1}^h n_j$$

where n_j is the sample number of group j , and r_{ij} is rank i in group j .
No classification is significant at the 0.10 level.

「各タイプの AAR₀ 値は等しい」を棄却できず、タイプ間の有意差を認めることはできなかった。したがって、AAR₀ 値と氷河の面積、基本的分類、涵養域形態、末端形状の間には有意な相関は認められず、AAR₀ 値すなわち質量均衡を仮定した時の AAR 値は約 60% に集中するものと考えられる。

一方、現成氷河の経年的な質量収支観測結果から、多くの氷河が長期的な負の質量収支傾向にあることが知られている。本研究で AAR₀ 値の平均値算出に用いた長期観測が行われている氷河についても、その多くが衰退傾向にある。これらの氷河の多くが山岳谷氷河であることを考慮すると、末端が後退し消耗域面積が減少した状態で平衡状態に達するものと予想され、AAR₀ 値を過小評価している可能性もある。その意味では本研究で得られた約 60% という値は暫定的な値であり、今後より多くの氷河の長期観測データを用い、質量収支傾向と AAR₀ 値との関係を検討する必要がある³⁾。

IV AAR 法によって復元される平衡線高度

AAR 法によって過去の氷河の地形的雪線高度を復元する場合、氷河地形から氷河の平面形を復元する必要がある。空中写真による氷河地形の判読法については五百沢 (1963) 以来多くの研究があり、明瞭な氷河地形に関してはほぼ確立されている。氷河の涵養域では侵食が卓越するため斜面上の傾斜変換線に着目して氷河の分布範囲を確定し、堆積が卓越する消耗域ではモレーンの配置によって氷舌の形態を確定する。氷河面積の確定の際にはモレーンによる氷舌端の認定が重要となる。

モレーンが形成されるためには氷河の末端がある程度の期間、同じ位置にとどまっている必要がある。劉・小野 (1997) はこの期間を「数年～数 10 年 (あるいはそれ以上)」としているが、最終氷期中に形成されたモレーンのように、形成後の時間経過が万年オーダーであるにもかかわらず地形判読に耐え

得るだけの規模のモレーンが残存している場合には、より長い期間、氷河末端が一定の位置に停滞していたと考えられる。現在でも、面積や末端位置の変動がほとんどないにもかかわらず単年の質量収支が正負に大きく変動している氷河は数多く存在する。過去の氷河の場合でも単年の質量収支は大きく変動していたかもしれないが、明瞭なモレーンが形成されている場合には長期的な質量収支は均衡しており、そのために氷河末端の位置が長期間変動しなかったとみなして差し支えない。したがって、過去の氷河によって形成された地形を用いた検討の際には、質量収支均衡時の AAR 値を用いる必要がある。

本研究では、現成氷河に関するデータを用い、質量収支が均衡している場合の AAR 値が氷河のタイプによらず⁴⁾、ほぼ一定の値 (約 60%) に収束することを示した。氷河地形にこの AAR 値を適用することにより、過去の地形的雪線を直接的に認定することができる。したがって、AAR 法は氷河地形から過去の地形的雪線高度を復元する簡便な方法として十分に利用可能であると考えられる。本研究で用いたデータの多くが資料の制約により中～高緯度に位置する小～中規模 (1～100 km²) の山岳谷氷河となっているため、この手法の広範な、とくに大面積氷河に対する適用は注意を要すると思われる。より多くの資料を解析することにより適用限界を検討することも今後の課題となろう。

本研究をまとめるにあたり、スイス国立チューリヒ工科大学教授の大村 纂教授には研究のきっかけと資料の提供をいただくとともに氷河の質量収支に関する有益な御指導をいただいた。国立極地研究所の森脇喜一教授、三浦英樹助手には特別共同利用研究員として大変お世話になった。東京大学地理学教室の米倉伸之教授、空間情報科学研究センターの小口 高助教授には終始御指導いただくとともに粗稿の校閲をしていただき、東京大学研究生の Michael Grossman 氏には英文要旨の校閲をしていただいた。東京大学地理学教室の大学院生、東京学芸大学自然地理ゼミ、寒冷地形談話会の諸氏には多くの御助言をいただいた。また、匿名査読者の方には資料に

関する重要な情報をいただいた。以上の方々に心から感謝の意を表します。

なお、本研究は1998年度国立極地研究所特別共同利用研究員研究発表会において発表した内容に加筆・修正したものである。

(投稿 1998年8月10日)

(受理 1999年7月10日)

注

- 1) Fujii and Higuchi (1977) に掲載されている Fig. 2 および Fig. 5 のうち岩屑被覆域の面積 (debris covered area) を消耗域面積と考え、(総面積－岩屑被覆域面積)／総面積を AAR とほぼ同義の値とみなした。なお、リストアップされた全 166 氷河の内 46 氷河が岩屑被覆域を持つ氷河であり、その内 13 氷河 (約 28%; C28, D35, D36, E3, E6, E21, E30, E33, E36, E45, E46, E49, E52) が 0.40 以下の値を示した。
- 2) 誤差範囲を超える 11 氷河 (1, 4, 5, 10, 14, 17, 18, 22, 28, 29, 32) に共通する特徴を現段階では把握していない。
- 3) 解析に用いた 32 氷河について、MBB No. 5 に基づいて負の質量収支傾向にある 19 氷河 (1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 13, 15, 18, 19, 20, 21, 23, 26, 27, 29, 33) と、安定～正の質量収支傾向にある 13 氷河に区分し、AAR₀ 値の平均を求めると、前者が $57.7 \pm 7.1\%$ 、後者は $61.4 \pm 5.6\%$ となり、負の質量収支傾向にある氷河が全体の AAR₀ 値の平均値を引き下げていることが確認された。しかし、有意水準 10% で t 検定および Kruskal-Wallis 検定を適用しても両者の間に有意差を認めることはできなかった。この点に関してはさらにデータを増やして検討することが必要であると考えている。
- 4) III で議論したとおり、雪崩涵養型の氷河については AAR₀ 値が極めて小さくなると予想される。本研究では氷河のタイプによる AAR₀ 値の平均値に統計的有意差がないことを示したが、各タイプの標本数はさほど大きくない。また、資料の制約により地域的に限定されたデータでもある。平均値の誤差 7% の中に氷河のタイプによる AAR₀ 値の本質的な差違が含まれているとも考えられる。より多くの資料を用いて、氷河のタイプ、地域による AAR₀ 値の差違を詳細に検討することが今後の課題となると考える。

文 献

- 五百沢智也 1963. 空中写真判読による日本アルプスの氷河地形 (演旨). 地理学評論 36: 734.
伊藤真人 1982. 北アルプス南部、蒲田川、右俣谷の氷河

地形. 地学雑誌 91: 20-35.

小野有五 1981. 広域的雪線. 町田 貞・井口正男・貝塚 爽平・佐藤 正・榎根 勇・小野有五編『地形学辞典』173. 二宮書店.

野上道男 1970. 雪線の定義とその決定法——Cordillera Real を例として. 第四紀研究 9: 7-16.

野上道男・小野有五 1981. 均衡線. 町田 貞・井口正男・貝塚爽平・佐藤 正・榎根 勇・小野有五編『地形学辞典』150-151. 二宮書店.

柳町 治 1983. 木曾山脈北部における最終氷期の氷河の消長と編年. 地学雑誌 92: 12-32.

柳町 治 1987. 氷河・周氷河地形からみた中部日本における最終氷期の気候. 第四紀研究 25: 295-303.

劉 大力・小野有五 1997. 解析図化機による氷河地形と過去の ELA (平衡線高度) の復元についての方法論的検討——日高山脈の例. 地形 18: 365-387.

Charlesworth, J. K. 1957. *The Quaternary era*. London: Edward Arnold Publishers.

Callender, G. S. 1950. Note on the relation between the height of the firn line and the dimensions of a glacier. *Journal of Glaciology* 1: 459-461.

Fujii, Y. and Higuchi, K. 1977. Statistical analysis of the forms of the glaciers in the Khumbu Himal. *Seppyo Special Issue* 39: 7-14.

Haerberli, W. 1985. *Fluctuations of glaciers 1976-1980*. Volume IV. Zurich: World Glacier Monitoring Service.

Haerberli, W. and Herren, E. 1991. *Glacier mass balance bulletin No. 1*. Zurich: World Glacier Monitoring Service.

Haerberli, W., Hoelzle, M. and Bosch, H. 1994. *Glacier mass balance bulletin No. 3*. Zurich: World Glacier Monitoring Service.

Haerberli, W., Hoelzle, M. and Suter, S. 1996. *Glacier mass balance bulletin No. 4*. Zurich: World Glacier Monitoring Service.

Haerberli, W., Hoelzle, M. and Frauenfelder, R. 1999. *Glacier mass balance bulletin No. 5*. Zurich: World Glacier Monitoring Service.

Hawkins, F. 1985. Equilibrium-line altitudes and paleoenvironment in the Merchants Bay area, Buffin Island. N. W. T., Canada. *Journal of Glaciology* 31: 205-213.

IAHS/UNEP/UNESCO 1988. *Fluctuations of glaciers 1980-1985*. Volume V. Zurich: World Glacier Monitoring Service.

IAHS/UNEP/UNESCO 1993. *Fluctuations of glaciers 1985-1990*. Volume VI. Zurich: World Glacier

- Monitoring Service.
- Kasser, P. 1973. *Fluctuations of glaciers 1966-1970*. Volume II. Zurich: the Permanent Service on the Fluctuation of Glaciers of the IUGG-FAGS/ICSU.
- Kulkarni, A. V. 1992. Mass balance of Himalayan glaciers using AAR and ELA methods. *Journal of Glaciology* 38: 101-104.
- Manly, G. 1959. The late-glacial climate of north-west England: Liverpool and Manchester. *Geological Journal* 2: 188-215.
- Meierding, T. C. 1982. Late Pleistocene glacial equilibrium-line in the Colorado Front Range: A comparison of methods. *Quaternary Research* 18: 289-310.
- Muller, F. 1977. *Fluctuations of glaciers 1971-1975*. Volume III. Zurich: the Permanent Service on the Fluctuation of Glaciers of the IUGG-FAGS/ICSU.
- Murray, D. R. and Locke, W. W. 1988. Dynamics of the late Pleistocene Big Timber glacier, Crazy Mountains, Montana, USA. *Journal of Glaciology* 35: 183-190.
- Nesje, A. 1992. Topographical effects on the equilibrium-line altitude on glaciers. *Geojournal* 27: 7-16.
- Ono, Y. 1984. Last glacial paleoclimate reconstructed from glacial and periglacial landforms in Japan. *Geographical Review of Japan* 57B: 87-100.
- Porter, S. C. 1975. Equilibrium-line altitudes of late Quaternary glaciers in the Southern Alps, New Zealand. *Quaternary Research* 5: 27-47.
- Torsnes, I., Rye, N. and Nesje, A. 1993. Modern and Little Ice Age equilibrium-line altitudes on outlet valley glaciers from Jostedalbreen, western Norway: An evaluation of different approaches to their calculation. *Arctic and Alpine Research* 25: 106-116.
- UNESCO/IAHS. 1970. *Perennial ice and snow masses: A guide for compilation and assemblage of data for a world inventory*. Technical Papers in Hydrology No. 1. Paris: UNESCO/IAHS.

Evaluation of the Accumulation Area Ratio (AAR) Method Based on Mass Balance Data for Modern Glaciers

Tatsuto AOKI (Graduate student, University of Tokyo)

The orographic snowline estimated from glacial landforms is an important index for paleoenvironmental reconstruction. The accumulation area ratio (AAR) method has been applied to glacial landforms to calculate the altitude of the past orographic snowline. The AAR values used in previous studies were, however, not identical, suggesting that the AAR method has not yet been uniformly established. This study seeks to find an AAR value suitable for reconstructing past orographic snowline altitudes. Analyses of data for modern glaciers show a positive correlation between annual mass balances and AAR values. When the mass balances for selected glaciers are zero, the average AAR lies in the range of $59.2 \pm 6.7\%$, regardless of glacier type and size. Distinct moraines formed in the past indicate a long-term steady state of glaciers. In this case, the average glacier mass balance is considered to be almost zero. Therefore past orographic snowlines can be reconstructed by applying the AAR value of 60 % to glacial landforms.

Key words: accumulation area ratio, orographic snowline, equilibrium line altitude, mass balance, glacial landforms